

УДК 621

**ПОВЫШЕНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ВАЛОВ,
ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ НАПЛАВКОЙ В СРЕДЕ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА****д-р техн. наук, проф. В.П. ИВАНОВ, Т.В. ВИГЕРИНА**
(Полоцкий государственный университет)

Приведены результаты исследования влияния различных наплавочных материалов на усталостную прочность валов с покрытиями, полученными электродуговой наплавкой в среде углекислого газа. Покрытия получены с помощью проволоки марок ПП-Нп-80Х20РЗТ, У7 и 08Х13. Минимальные значения предела выносливости валов с покрытиями получаются при наплавке порошковой проволокой ПП-Нп-80Х20РЗТ. По сравнению с другими покрытиями оно обладает максимальной твердостью и износостойкостью, но при этом характеризуется повышенной хрупкостью и вследствие этого снижает усталостную прочность. Максимальные значения усталостной прочности возникают при наплавке проволокой У7. Проволока не содержит легирующих элементов, поэтому при наплавке происходит выгорание углерода в большей степени, что приводит к снижению твердости покрытия, но при этом усталостная прочность валов выше, чем у валов с покрытиями из порошковой проволоки и проволоки 08Х13.

Обзор работ, связанных с наплавкой валов. Изнашивание шеек валов, работающих в условиях трения скольжения, повышает неравномерность крутящего момента, вызывает крутильные продольные и поперечные колебания. Под действием циклических напряжений в материале вала зарождаются и постепенно развиваются трещины, вызывающие в конечном итоге разрушение детали. Это разрушение опасно потому, что может протекать под действием напряжений, намного меньших пределов прочности и текучести. Более 80 % всех случаев эксплуатационного разрушения валов происходит в результате циклического нагружения [1].

Для решения проблемы восстановления валов, работающих в условиях циклического нагружения, широко используются различные способы наплавки: электродуговая под слоем флюса; электродуговая в среде защитных газов; плазменная и др.

Для нанесения покрытий при восстановлении валов на ряде ремонтных предприятий используют разновидности наплавки под слоем флюса:

- 1) наплавка проволокой Нп-30ХГСА под слоем флюса АН-348А с применением различных вариантов термообработки (отпуск, закалка, отжиг и нормализация);
- 2) наплавка, предусматривающая применение плавного флюса АН-348А с добавками графита, феррохрома, феррованадия, алюминия и др.

Способы наплавки под слоем флюса обеспечивают сопротивление усталости порядка 80...84 % от уровня новых валов за счет введения в технологический процесс восстановления термических операций, способствующих снятию внутренних напряжений, созданию в поверхностных слоях сжимающих напряжений, улучшению механических свойств наплавленного материала и зоны термического влияния. Недостатками этих способов является их высокая трудоемкость и необходимость применения дефицитного электротермического оборудования. Основным недостатком при наплавке легированными материалами без применения термообработки на галтелях между шейками и щеками является образующаяся зона сплавления, имеющая низкую пластичность. В зоне термического влияния из-за резкой структурной неоднородности (на шейках образуется мартенсит с твердостью 60 HRC, на щеках – перлит с твердостью 170 HB) возникают микротрещины, усиливается концентрация напряжений, и как следствие, снижается сопротивление усталости. При этом из-за значительного термического влияния (глубина проплавления 0,5...2,0 мм) происходит деформация вала.

Широкое распространение получила наплавка в среде углекислого газа [2]. Этот способ не требует использования флюсов и электродных покрытий. Данный способ позволяет получать наплавленные покрытия высокого качества (без пор, раковин и трещин). Одной из разновидностей способов наплавки является плазменная наплавка [3, 4]. Для восстановления коленчатых валов используют комбинированный способ плазменной наплавки, заключающийся в использовании для формирования покрытий проволоки и порошков из самофлюсующихся сплавов на никелевой основе [5]. Способ позволяет повысить износостойкость и обеспечить образование сжимающих напряжений за счет аустенитно-мартенситных превращений в слое. Для наплавки валов, работающих в условиях циклического нагружения, используют износостойкие наплавочные металлы, отличающиеся по составу и структуре от основного металла. Для уменьшения деформаций и предупреждения трещин стремятся к тому, чтобы зона перемешивания была минимальной, а ее материал имел высокие значения пластичности и прочности, обладала структурой, способной в процессе работы упрочняться и повышать сопротивление усталости. В большинстве случаев при восстановлении деталей более рационально наплавлять на изношенные поверхности твердые по-

рошковые сплавы, обладающие высокой износостойкостью. Однако эти сплавы не обеспечивают в зоне сплавления достаточной прочности сцепления из-за образования хрупких прослоек. Поэтому в практике часто идут на усложнение технологии и наплавляют вначале подслоу из более пластичного наплавочного материала из низкоуглеродистой стали (Св-08А, Св-08Г2 и др.), а затем – износостойкий материал, который требуется на поверхности восстанавливаемой детали [6]. Назначение подслоя – уменьшить переход углерода из основного металла в наплавляемый, не допустить образования хрупких кристаллизационных трещин, т.е. обеспечить необходимые свойства в зоне сплавления требуемого наплавочного материала с основным. Поэтому для повышения сопротивления усталости нередко целесообразно отдать предпочтение наплавочному металлу с меньшим пределом прочности, менее износостойкому, но более пластичному.

Усилия многих научных организаций и ремонтных заводов направлены на решение проблемы восстановления и упрочнения коленчатых валов. Существующие способы наплавки позволяют эффективно восстанавливать изношенные участки валов, но проблема значительного снижения усталостной прочности при их восстановлении не находят удовлетворительного решения в настоящее время. На практике часто идут на усложнение технологии и наплавляют вначале подслоу из более пластичного наплавочного материала, что решает проблему, но при этом значительно увеличивается трудоемкость технологии восстановления.

Цель работы – повышение усталостной прочности валов, восстанавливаемых наплавкой в среде углекислого газа, и исследование влияния материала восстановительных покрытий на усталостную прочность валов.

Результаты исследований и их обсуждение. Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи: получение восстановительных покрытий с помощью наплавки проволоки различного химического состава; изучение микроструктуры полученных покрытий; влияние микроструктуры наплавленных покрытий на усталостную прочность восстановленных валов. Для нанесения покрытий использовали проволоки марок ПП-Нп-80Х20РЗТ, У7 и 08Х13 (табл. 1). В качестве материала для изготовления образцов – сталь 45, как наиболее часто используемую для изготовления валов.

Таблица 1

Химический состав наплавляемой проволоки

Марка проволоки	Химический состав, масс. %							
	C	Si	Mn	Cr	Cu	Ni	B	Fe
ПП-Нп-80Х20РЗТ ГОСТ 26101-84	0,7...0,9	≤ 0,8	≤ 0,8	19...21	–	≤ 0,6	3...5	основа
У7	0,65...0,74	0,17...0,33	0,17...0,33	0,2 max	0,25 max	0,25 max		основа
08Х13	≤ 0,08	≤ 0,8	≤ 0,8	12...14	–	≤ 0,6	–	основа

После наплавки проводили шлифование вала на круглошлифовальном станке мод. 3А151 до шероховатости Ra 0,16...0,32 мкм. Покрытия на образцы наносили с помощью электродуговой наплавки в среде углекислого газа. Образцы изготавливались в соответствии с ГОСТ 25.502-79 (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид наплавленного образца после испытаний на усталость

Режимы нанесения восстановительных покрытий приведены в таблице 2.

Таблица 2

Режимы нанесения покрытий

Марка наплавляемой проволоки	Диаметр, наплавляемой проволоки, мм	Режимы наплавки
ПП-Нп-80Х20РЗТ	3,2	$I = 50$ А; $v_{напл.} = 33$ мм/мин
7	1,6	$I = 46$ А; $U = 30...40$ В; $v_{напл.} = 31$ мм/мин
08Х13	1,2	$I = 40$ А; $v_{напл.} = 36$ мм/мин
Напряжение $U = 30...40$ В; расход газа $Q_{CO_2} = 8...15$ л/мин.		

Усталостные испытания проводились на машине УКИ-10М, которая позволяет задавать образцу необходимое переменное напряжение с одновременным учетом количества циклов в любой момент испытаний. Разрушение образца приводило к остановке машины и счётчика, что позволяло определить количество циклов, предшествующих разрушению. Сложность проведения таких усталостных испытаний заключается в необходимости обеспечения равномерной толщины наносимого покрытия на рабочую поверхность

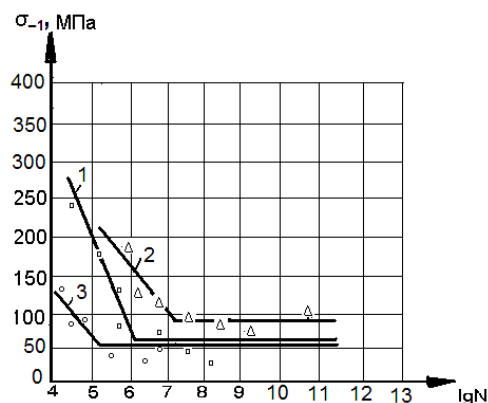


Рис. 2. Кривые усталости образцов с наплавленными покрытиями:
1 – Сталь 08Х13 (○); 2 – Сталь У7 (Δ);
3 – ПП-Нп-80Х20РЗТ (□)

Представленная на рисунке 3 схема основана на предположении, что покрытие блокирует дислокации в поверхностном слое основного металла и стесняет развитие пластического деформирования.

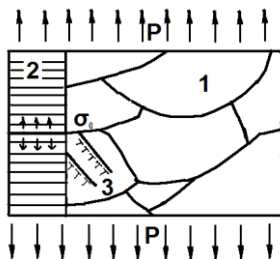


Рис. 3. Схема зарождения усталостных трещин в материале при наличии напыленного покрытия

Установлено, что даже на идеально гладких образцах при циклическом нагружении трещины появляются прежде всего на поверхности. Поверхность покрытия играет роль источника трещин, так как на ней всегда имеются готовые концентраторы напряжений в виде пор, несплошностей на границе с основным металлом, готовые трещины, возникающие в процессе напыления и наплавки, рыхлые границы между слоями и др. Если покрытие формируется при достаточно высокой температуре, то в диффузионной зоне образуются объемы с повышенной плотностью дислокаций и вакансий. Перераспределение избыточных вакансий и их сток в определенных точках обуславливают появление микропор. Образующиеся в диффузионной зоне области растяжения и сжатия способствуют микропластической деформации основного металла и превращению микропор в трещину. Таким образом, нанесение покрытия в этом случае сопровождается повышением дефектности поверхностных слоев основного металла. Причем чем больше упрочнено покрытие, т.е. чем больше оно склонно к хрупкому разрушению, тем опаснее становятся любые несплошности, поры и другие дефекты [11, 12].

Покрытия, полученные в результате наплавки, отличаются высокой твердостью и износостойкостью, но при этом они характеризуются повышенной хрупкостью и вследствие этого снижают усталостную прочность, так как сопротивление росту трещин у материала этих покрытий минимально. Основной металл в зоне термического влияния охрупчен в связи с тем, что покрытие получали дуговым методом со значительными тепловложениями [13]. Максимальные значения усталостной прочности получены при наплавке проволокой У7 (см. рис. 2). В нашем случае твердость наплавленного металла определяется содержанием углерода: чем выше содержание углерода, тем выше твердость. Проволока не содержит карбидообразующие легирующие элементы, поэтому при наплавке происходит более интенсивное выгорание углерода, а

образца, стабилизации режимов процесса нанесения покрытия и качественного выполнения шлифования по переходной галтели образца.

По результатам испытаний были построены кривые усталости для образцов, наплавленных различными материалами (рис. 2). Как правило, разрушение образцов, деталей машин и элементов конструкций происходит по нескольким параллельным или последовательно протекающим микромеханизмам разрушения. Включение в работу того или иного механизма зависит от материала основы и покрытия, среды, режимов нагружения, схемы напряженно-деформируемого состояния и др. [7].

Основное условие сохранения и повышения усталостной прочности покрытий, получаемых при восстановлении шеек коленчатых валов, – создание как в наплавленном металле, так и в зоне термического влияния благоприятных (сжимающих) напряжений. Модель механизма зарождения трещины в композиции «основа – покрытие» при циклическом нагружении предложена в работах [8, 9].

При нагружении источник дислокаций 3 начинает функционировать, испуская дислокации, граница «покрытие – основа» блокирует дислокации, создавая локальные повышения их плотности. В микрообъеме, непосредственно прилегающем к границе, образуется плоское скопление краевых дислокаций, причем они могут находиться на столь близком расстоянии друг от друга, что их экстраплоскости сливаются, вызывая появление растягивающих напряжений. Если покрытие достаточно хрупкое, то растягивающие напряжения приводят к возникновению в покрытии микротрещин, распространяющихся в основной металл. Согласно другой схеме [10], появление и распространение трещин может происходить непосредственно от поверхности покрытия.

также при перемешивании с основой (Сталь 45), что приводит к снижению твердости материала покрытия, но при этом усталостная прочность образцов повышается. На рисунке 4 приведены микроструктуры покрытий, полученных наплавкой различными марками проволоки. Видно, что микроструктура покрытия проволокой У7 однородна с микроструктурой основы и переход от основного металла к наплавленному визуально определяется лишь по размеру зерен (рис. 4, в). Проволока не содержит легирующие элементы, коэффициент термического расширения материала покрытия и основы практически одинаков, что снижает риск появления трещин и благоприятно сказывается на усталостной прочности. Минимальные значения предела усталостной прочности возникают при наплавке порошковой проволокой ПП-Нп-80Х20Р3Т и проволокой 08Х13. На микроструктурах (рис. 4, а и б) наблюдается переходная зона порядка 50...70 мкм, материал покрытий и основы очень сильно отличается по химическому составу, что снижает усталостную прочность. Покрытие из порошковой проволоки ПП-Нп-80Х20Р3Т обладает максимальной твердостью за счет высокого содержания углерода и дополнительного легирования бором. Низкая усталостная прочность является следствием образования в зоне сплавления с основой хрупких слоев.

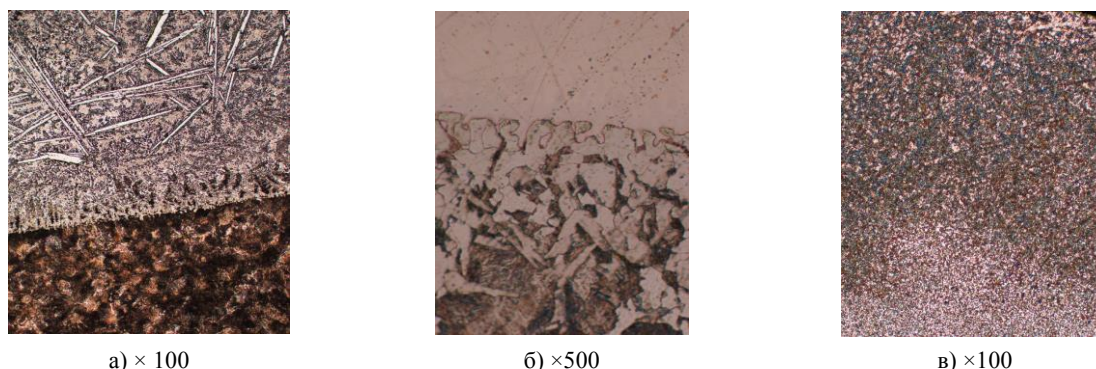


Рис. 4. Микроструктура материала вала, наплавленного проволокой:
а – порошковая ПП-Нп-80Х20Р3Т; б – сталь 08Х13; в – сталь У7

Партия распределительных валов, восстанавливаемых наплавкой в среде углекислого газа в условиях Полоцкого завода «Проммашремонт», находится в эксплуатации. Случаев их отказа не было.

Выводы. Для повышения усталостной прочности валов, восстанавливаемых электродуговой наплавкой в среде углекислого газа и работающих в условиях циклического нагружения, рекомендуется наносить покрытия, содержащие малое количество легирующих элементов. Использование материалов с высоким содержанием углерода, дополнительно легированных карбидообразующими элементами, приводит к снижению усталостной прочности вследствие образования в зоне сплавления с основой хрупких слоев.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карагодин, В.И. Ремонт автомобилей и двигателей / В.И. Карагодин, Н.Н. Митрохин. – М.: Мастерство; Высш. школа, 2001. – 496 с.
2. Безбородов, И.А. Восстановление чугуновых коленчатых валов наплавкой / И.А. Безбородов // Техника в сельском хозяйстве. – 1986. – № 10. – С. 44 – 46.
3. Ульман, И.Е. Восстановительная наплавка коленчатых валов дизельных двигателей / И.Е. Ульман, Г.А. Тонн, В.И. Черноиванов // Сварочное производство. – 1984. – № 6. – С. 38 – 39.
4. Нанесение покрытий плазмой / В.В. Кудинов [и др.]; под общ. ред. В.В. Кудинова. – М., 1990. – 213 с.
5. Сидоров, А.И. Восстановление коленчатых валов тракторных двигателей плазменной наплавкой / А.И. Сидоров, К.А. Ильясов // Сварочное производство. – 1983. – № 4. – С. 38.
6. Кравцов, Т.Г. Восстановление деталей при ремонте судов / Т.Г. Кравцов, В.П. Сторожев. – М.: Транспорт, 1981. – 119 с.
7. Завистовский, В.Э. Механика разрушения и прочность материалов с покрытиями / В.Э. Завистовский. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т, 1999. – 144 с.
8. Влияние покрытий и их дислокационной структуры на механические свойства и внутреннее трение твердых тел / В.Ф. Шатинский [и др.] // Свойства конструкционных материалов при воздействии рабочих сред. – Киев: Наукова думка, 1980. – С. 267 – 276.
9. Максимович, Т.Г. Физико-химические процессы при плазменном напылении и разрушении материалов с покрытиями / Т.Г. Максимович, В.Ф. Шатинский, В.И. Копылов. – Киев: Наукова думка, 1983. – 264 с.
10. Тушинский, Л.И. Исследование структуры и физико-механических свойств покрытий / Л.И. Тушинский, А.В. Плохов. – Новосибирск: Наука, 1986. – 200 с.

11. Криштал, М.А. Исследование дефектов, возникающих при образовании покрытий, поверхностном упрочнении и эксплуатации деталей машин большого ресурса / М.А. Криштал // Проблемы прочности. – 1981. – № 3. – С. 84 – 90.
12. Irwin, G.R. Fracture Dynamics. Fracturing of Metal / G.R. Irwin. – Cleveland: Ohio, 1948. – P. 147.
13. Лившиц, Л.С. Металловедение для сварщиков (сварка сталей) / Л.С. Лившиц. – М.: Машиностроение, 1979. – 179 с.

Поступила 02.06.2008